

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION  
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)(19) Organisation Mondiale de la Propriété  
Intellectuelle  
Bureau international(43) Date de la publication internationale  
7 octobre 2004 (07.10.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2004/086557 A2**(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : H01Q 1/12(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2004/000684

(22) Date de dépôt international : 19 mars 2004 (19.03.2004)

(25) Langue de dépôt : français

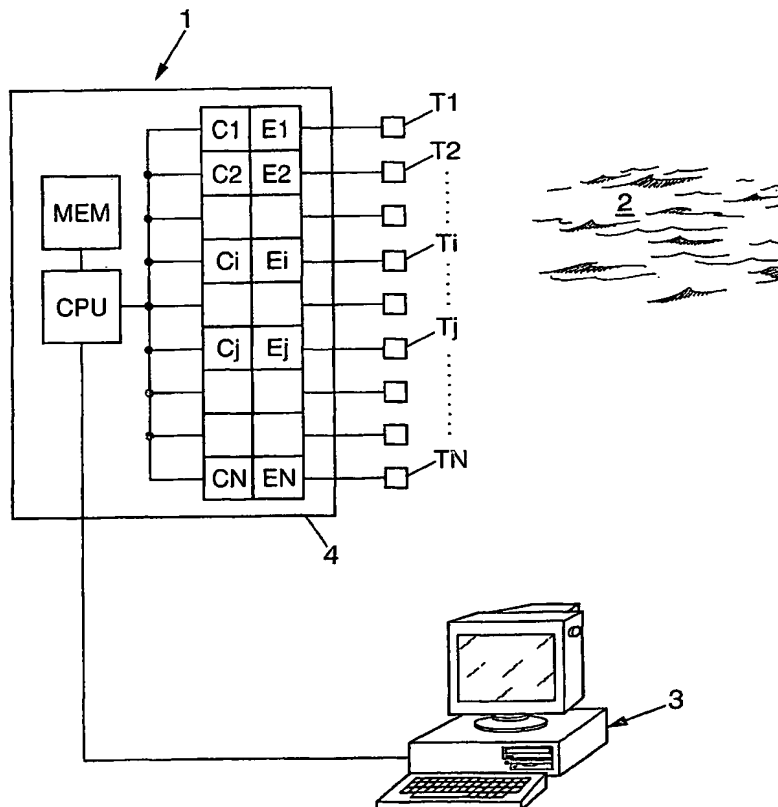
(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
03/03545 24 mars 2003 (24.03.2003) FR(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) :  
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS [FR/FR]; 3, rue Michel Ange, F-75794 Paris Cedex 16 (FR). UNIVERSITE PARIS 7 - DENIS DIDEROT [FR/FR]; 2, place Jussieu, F-75251 Paris Cedex 05 (FR).(72) Inventeurs; et  
(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : FINK, Matthias [FR/FR]; 16, rue E. Laferrière, F-92190 Meudon (FR). DE LA GORGUE DE ROSNY, Julien [FR/FR]; 154, rue de Charenton, F-75012 Paris (FR). JULIA, Claire [FR/FR]; 60, rue Madame, F-75006 Paris (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD OF DETERMINING IMPULSE RESPONSES FROM A MEDIUM IN RELATION TO THE TRANSMISSION OF WAVES BETWEEN DIFFERENT POINTS

(54) Titre : PROCÉDE POUR DETERMINER DES REPONSES IMPULSIONNELLES D'UN MILIEU VIS-À-VIS DE LA TRANSMISSION D'ONDES ENTRE DIFFERENTS POINTS



(57) Abstract: The invention relates to a method of determining impulse responses from a medium (2) in relation to the transmission of waves between different points (T1-TN). The inventive method consists in: transmitting waves in the medium by generating, at each point  $i$ , signals  $e_i(t)$  each comprising  $n$  elementary signals with respective frequencies which are spaced apart in pairs by an interval  $\delta f$  and which are different from the frequencies of the elementary signals corresponding to the other points; receiving signals  $r_j(t)$  at points  $j$  after the transmission of the aforementioned waves in the medium; and calculating each impulse response  $h_{ij}(t)$  from a correlation signal between signal  $e_i(t)$  transmitted at point  $i$  and signal  $r_j(t)$  received at point  $j$ .

(57) Abrégé : Procédé pour déterminer des réponses impulsionnelles d'un milieu (2) vis-à-vis de la transmission d'ondes entre différents points (T1-TN), on émet des ondes dans le milieu en générant en chaque point  $i$  des signaux  $e_i(t)$  constitués chacun de  $n$  signaux élémentaires de fréquences respectives espacées deux à deux d'un

[Suite sur la page suivante]



**FOLEGOT, Thomas** [FR/FR]; 101, rue Jean-Jaurès,  
F-29200 Brest (FR).

(74) **Mandataires : BURBAUD, ERIC** etc.; Cabinet Plasser-  
aud, 65/67, rue de la Victoire, F-75440 Paris Cedex 09  
(FR).

(81) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de  
protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AT,  
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,  
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,  
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,  
KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,  
MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH,  
PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN,  
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de  
protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM,

KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasienn  
(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT,  
BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR,  
HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),  
OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML,  
MR, NE, SN, TD, TG).

**Déclaration en vertu de la règle 4.17 :**

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)) pour US  
seulement*

**Publiée :**

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée  
dès réception de ce rapport*

*En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abrégia-  
tions, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et  
abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de  
la Gazette du PCT.*

pas  $\delta f$  et distinctes des fréquences des signaux élémentaires correspondant aux autres points, puis on capte des signaux  $r_j(t)$  en des points  $j$  après transmission desdites ondes dans le milieu, et on calcule chaque réponse impulsionnelle  $h_{ij}(t)$  à partir d'un signal de corrélation entre le signal  $e_i(t)$  émis au point  $i$  et le signal  $r_j(t)$  capté au point  $j$ .

Procédé pour déterminer des réponses impulsionnelles d'un milieu vis-à-vis de la transmission d'ondes entre différents points.

5 La présente invention est relative aux procédés pour déterminer des réponses impulsionnelles d'un milieu vis-à-vis de la transmission d'ondes entre différents points.

10 Plus particulièrement, l'invention concerne un procédé pour déterminer des réponses impulsionnelles d'un milieu vis-à-vis de la transmission d'ondes entre différents points, procédé comprenant :

(a) au moins une étape d'émission au cours de laquelle on émet des ondes dans le milieu en générant des signaux  $e_i(t)$  à partir d'un nombre  $N$  de points d'émission appartenant au milieu, où  $N$  est un nombre entier au moins égal à 2 et  $i$  est un indice compris entre 1 et  $N$  qui désigne l'un desdits  $N$  points d'émission,

20 (b) au moins une étape de réception au cours de laquelle on capte des signaux  $r_j(t)$  à partir desdites ondes après transmission dans ledit milieu, en un nombre  $M$  de points de réception appartenant au milieu (ces points de réception peuvent être confondus avec les points d'émission), où  $M$  est un entier naturel non nul et  $j$  est un indice compris entre 1 et  $M$  qui désigne l'un desdits  $M$  points de réception,

30 (c) et au moins une étape de détermination desdites réponses impulsionnelles  $h_{ij}(t)$  entre chaque point d'émission  $i$  et chaque point de réception  $j$  à partir des signaux émis  $e_i(t)$  et captés  $r_j(t)$ .

Les réponses impulsionnelles peuvent être déterminées aux fins de focalisation d'ondes dans le milieu, par exemple aux fins d'imagerie du milieu ou de communication sélective entre différents points du milieu, notamment dans le cadre de la mise en œuvre de la

méthode "D.O.R.T." (Décomposition de l'Opérateur Retournement Temporel) décrite notamment par Prada et al. (C. Prada and M. Fink, "Eigenmodes of the time reversal operator: a solution to selective focusing in multiple-target media." *Wave Motion*, 20, pp 151-163 (1994)).

Le processus d'acquisition des réponses impulsionnelles entre les points en question du milieu est toutefois relativement lent, dans la mesure où il est effectué séquentiellement, pour les différents points d'émission les uns à la suite des autres, comme décrit par exemple dans le document WO-A-02/32 316 dans le cadre d'un procédé de focalisation d'ondes acoustiques autre que la méthode "D.O.R.T." susmentionnée.

Cette lenteur allonge le temps de mise en œuvre du procédé, et lorsque le milieu est changeant, elle ne permet pas d'obtenir les réponses impulsionnelles assez vite pour pouvoir être valablement utilisées ensuite dans ce milieu.

La présente invention a notamment pour but de pallier ces inconvénients.

A cet effet, selon l'invention, un procédé du genre en question est caractérisé en ce qu'au cours de l'étape (a), on fait émettre simultanément les signaux  $e_i(t)$  par lesdits  $N$  points d'émission, ces signaux  $e_i(t)$  ayant une durée  $T$  et étant chacun une somme de  $n$  signaux élémentaires sensiblement monochromatiques, de même amplitude et de fréquences respectives  $f_{0,i} + k \cdot \delta f$ , où  $f_{0,i}$  est une fréquence prédéterminée propre au point  $i$ ,  $k$  est un nombre entier compris entre 0 et  $n$ ,  $n$  est un nombre entier au moins égal à 2 et  $\delta f$  est un pas fréquentiel prédéterminé, les fréquences  $f_{0,i}$  respectives propres aux différents points  $i$  étant distinctes les unes des autres et comprises dans une bande de fréquences de largeur  $\delta f$ , et en ce qu'au cours de l'étape (c), on calcule chaque réponse impulsionnelle  $h_{ij}(t)$  à partir d'un signal de corrélation entre le signal  $e_i(t)$  émis au point  $i$  et le

signal  $r_j(t)$  capté au point  $j$ .

Grâce à ces dispositions, on calcule simultanément les réponses impulsionnelles entre  $N$  points d'émission et  $M$  points de réception (éventuellement confondus avec les points d'émission), ce qui accélère le processus d'acquisition des réponses impulsionnelles.

Dans divers modes de réalisation du procédé selon l'invention, on peut éventuellement avoir recours en outre à l'une et/ou à l'autre des dispositions suivantes :

10 - les fréquences  $f_{0,i}$  respectives propres aux différents points  $i$  sont séparées deux à deux par un écart  $\delta f/N$  ;

- au cours de l'étape (c), ledit signal de corrélation est fenêtré au moyen d'une fonction porte  $n(t)$  de largeur  $1/\delta f$  ;

15 - au cours de l'étape (c), les réponses impulsionnelles  $h_{ij}(t)$  sont déterminées par la formule :

$$h_{ij}(t) = \Pi(t) \cdot \int e^{i(\theta - t)} r_j(\theta) d\theta ;$$

20 - les ondes transmises dans le milieu entre les points d'émission et les points de réception sont des ondes acoustiques ;

- au cours de l'étape (a), le milieu où sont émises les ondes est réverbérant ;

25 - le pas fréquentiel  $\delta f$  est inférieur ou égal à  $1/\tau$ , où  $\tau$  est la dispersion temporelle du milieu (c'est-à-dire la durée du signal capté après émission d'un signal impulsionnel dans le milieu) ;

- le pas fréquentiel  $\delta f$  est sensiblement égal à  $1/\tau$ , où  $\tau$  est la dispersion temporelle du milieu ;

30 - la durée  $T$  est au moins égale à  $N/\delta f$  ;

- la durée  $T$  est au moins égale à  $N \cdot \tau$ , où  $\tau$  est la dispersion temporelle du milieu ;

- les signaux élémentaires présentent des phases aléatoires ;

- les ondes sont émises avec une certaine bande passante, les fréquences  $f_{0i}$  comprennent une fréquence minimale  $f_0$  et le nombre  $n$  est déterminé pour que la bande de fréquence comprise entre  $f_0$  et  $f_0 + [(n+1) \cdot \delta f]$  recouvre  
5 sensiblement ladite bande passante ;

- les points de réception sont confondus avec les points d'émission.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront au cours de la description  
10 suivante de deux de ses modes de réalisation, donnés à titre d'exemples non limitatifs, en regard des dessins joints.

Sur le dessin, la figure 1 est une vue schématique d'un dispositif adapté pour mettre en œuvre la présente  
15 invention, dans un mode de réalisation.

Dans l'exemple non limitatif représenté sur le dessin, le procédé selon un mode de réalisation de l'invention est mis en œuvre par un dispositif 1 qui est adapté pour émettre et recevoir des ondes dans un milieu 2  
20 homogène ou non, généralement réverbérant, qui peut être solide, liquide ou gazeux. Les ondes en question sont de préférence acoustiques et la description ci-après ne fera référence qu'à de telles ondes acoustiques, mais lesdites ondes pourraient éventuellement être d'une autre nature,  
25 par exemple de nature électromagnétique.

Le dispositif 1 comporte par exemple un ordinateur 3, ou tout autre dispositif de commande similaire, qui commande les émissions d'ondes acoustiques et leur écoute dans le milieu 2. A cet effet, l'ordinateur 3 peut par  
30 exemple commander un dispositif électronique dédié 4 qui peut notamment comporter une unité centrale électronique CPU associée à une mémoire centrale MEM, cette unité centrale CPU commandant elle-même  $N$  voies ( $N$  étant un entier au moins égal à 2) reliées chacune à un transducteur  
35 T1-TN permettant d'émettre et de capter des signaux

acoustiques dans le milieu 2. Toutes les voies sont synchronisées entre elles.

Chaque voie de mesure du dispositif 4 peut comporter par exemple un échantillonneur E1-EN relié au transducteur correspondant T1-TN, et chaque échantillonneur peut être lui-même relié à une mémoire associée à une unité centrale, référencées conjointement C1-CN.

Le dispositif 1 peut être utilisé notamment aux fins d'imagerie du milieu 2, ou encore pour établir une communication sélective avec un point dudit milieu, ou autre, par exemple en utilisant la méthode "D.O.R.T." (Décomposition de l'Opérateur Retournement Temporel) décrite notamment par Prada et al. (C. Prada and M. Fink, "Eigenmodes of the time reversal operator: a solution to selective focusing in multiple-target media." *Wave Motion*, 20, pp 151-163 (1994)).

Dans tous les cas, il est nécessaire de déterminer les réponses impulsionnelles entre les transducteurs T1-TN.

A cet effet, l'ordinateur 3 commande le dispositif 1 de façon qu'il suive successivement les étapes suivantes :

(a) au moins une étape d'émission au cours de laquelle on émet des ondes dans le milieu en générant des signaux  $e_i(t)$  à partir des N transducteurs T1-TN (ces N transducteurs peuvent le cas échéant ne constituer qu'une partie des transducteurs reliés au dispositif 4, auquel cas les réponses impulsionnelles relatives à l'ensemble des transducteurs seraient acquises en plusieurs passes successives, ces passes restant toutefois en nombre très inférieur au nombre total de transducteurs), i étant un indice compris entre 1 et N qui désigne l'un desdits N transducteurs ;

(b) au moins une étape de réception au cours de laquelle les N transducteurs T1-TN captent des signaux  $r_j(t)$  à partir desdites ondes après transmission dans ledit

milieu, où  $j$  est un indice compris entre 1 et  $N$  désignant l'un desdits transducteurs ;

(c) et au moins une étape de détermination desdites réponses impulsionnelles  $h_{ij}(t)$  entre chaque point d'émission  $i$  et chaque point de réception  $j$  à partir des signaux émis  $e_i(t)$  et captés  $r_j(t)$ .

Pour permettre d'acquérir en une seule fois tous les signaux nécessaires à la détermination des réponses impulsionnelles concernant les  $N$  transducteurs susmentionnés (c'est-à-dire tout ou partie des transducteurs reliés au dispositif 4, comme expliqué ci-dessus), tous les signaux  $e_i(t)$  sont émis simultanément au cours de l'étape (a) par les  $N$  transducteurs, mais ces signaux émis sont orthogonaux entre eux de façon que les informations propres à chaque point d'émission puissent ensuite être séparées les unes des autres dans les signaux captés  $r_j(t)$ .

Ainsi, chaque signal émis  $e_i(t)$  est égal à la somme de  $n$  signaux élémentaires sensiblement monochromatiques, de même amplitude et de fréquences respectives  $f_{0,i} + k \cdot \delta f$ , où :

- $f_{0,i}$  est une fréquence prédéterminée propre au transducteur  $i$ ,
- $k$  est un nombre entier compris entre 0 et  $n$ ,
- $n$  est un nombre entier au moins égal à 2,
- et  $\delta f$  est un pas fréquentiel prédéterminé, avantageusement inférieur ou égal à  $1/\tau$  et de préférence sensiblement égal à  $1/\tau$ , où  $\tau$  est une valeur moyenne de la dispersion temporelle du milieu 2, c'est-à-dire la durée du signal capté après émission d'un signal impulsionnel (fonction de Dirac) dans le milieu 2.

Les fréquences  $f_{0,i}$  respectives propres aux différents points  $i$  sont distinctes les unes des autres et comprises dans une bande de fréquences de largeur  $\delta f$  : avantageusement, ces fréquences  $f_{0,i}$  sont séparées deux à deux par un écart  $\delta f/N$ .



De plus, si BP est la bande passante avec laquelle les ondes acoustiques sont émises et reçues par les transducteurs, et si on nomme  $f_0$  la plus faible des fréquences  $f_{0i}$ , alors  $f_0$  et  $n$  peuvent avantageusement être  
 5 déterminés pour que la bande des fréquences des signaux élémentaires (bande comprise entre  $f_0$  et  $f_0 + [(n+1) \cdot \delta f]$ ) recouvre sensiblement ladite bande passante.

Avantageusement, les signaux élémentaires composant les signaux  $e_i(t)$  présentent des phases aléatoires.

10 Tous les signaux  $e_i(t)$  ont une même durée  $T$ , qui est avantageusement au moins égale à  $N/\delta f$ , et de préférence au moins égale à  $N \cdot \tau$ .

Au cours de l'étape (c), on calcule chaque réponse impulsionnelle  $h_{ij}(t)$  à partir d'un signal de corrélation  
 15 entre le signal  $e_i(t)$  émis au point  $i$  et le signal  $r_j(t)$  capté au point  $j$ .

Dans l'exemple considéré ici, ce signal de corrélation vaut:

$$c_{ij}(t) = \int e_i(\theta) \cdot r_j(t - \theta) d\theta \text{ (cette intégrale est faite par}$$

20 exemple sur une durée au moins égale à  $T$ , dont le début coïncide avec le début du signal  $r_j(t)$ ).

Avantageusement, ce signal de corrélation est fenêtré au moyen d'une fonction porte  $\pi(t)$  de largeur  $1/\delta f$  (valant 1 pendant une période de  $1/\delta f$  et 0 en dehors de  
 25 cette période), auquel cas les réponses impulsionnelles  $h_{ij}(t)$  peuvent avantageusement être déterminées par la formule :

$$h_{ij}(t) = \Pi(t) \cdot c_{ij}(t) .$$

On notera que, dans l'exemple particulier  
 30 représenté sur le dessin et décrit ci-dessus, les points de réception  $j$  auxquels on capte l'onde acoustique sont confondus avec les points d'émission et constitués par les transducteurs  $T_1$ - $T_N$ , mais les points de réception en question peuvent le cas échéant être constitués par un

second réseau de transducteurs (non représenté), distinct du réseau de transducteurs T1-TN.

Dans le cas général, les ondes acoustiques qui sont générées par l'émission des signaux  $e_i(t)$  sont donc captées en M points de réception, M étant un nombre entier non nul, lesquels M points de réception peuvent être soit confondus avec les N points d'émission (auquel cas  $M = N$ ), soit non totalement confondus avec les points d'émission, soit entièrement distincts des points d'émission.

REVENDICATIONS

1. Procédé pour déterminer des réponses  
impulsionnelles d'un milieu (2) vis-à-vis de la  
5 transmission d'ondes entre différents points (T1-TN),  
procédé comprenant :

(a) au moins une étape d'émission au cours de  
laquelle on émet des ondes dans le milieu (2) en générant  
des signaux  $e_i(t)$  à partir d'un nombre N de points  
10 d'émission (T1-TN) appartenant au milieu, où N est un  
nombre entier au moins égal à 2 et i est un indice compris  
entre 1 et N qui désigne l'un desdits N points d'émission,

(b) au moins une étape de réception au cours de  
laquelle on capte des signaux  $r_j(t)$  à partir desdites ondes  
15 après transmission dans ledit milieu, en un nombre M de  
points de réception (T1-TN) appartenant au milieu, où M est  
un entier naturel non nul et j est un indice compris entre  
1 et M qui désigne l'un desdits M points de réception,

(c) et au moins une étape de détermination  
20 desdites réponses impulsionnelles  $h_{ij}(t)$  entre chaque point  
d'émission i et chaque point de réception j à partir des  
signaux émis  $e_i(t)$  et captés  $r_j(t)$ ,

**caractérisé en ce qu'**au cours de l'étape (a), on fait  
émettre simultanément les signaux  $e_i(t)$  par lesdits N  
25 points d'émission (T1-TN), ces signaux  $e_i(t)$  ayant une  
durée T et étant chacun une somme de n signaux élémentaires  
sensiblement monochromatiques, de même amplitude et de  
fréquences respectives  $f_{0,i} + k \cdot \delta f$ , où  $f_{0,i}$  est une fréquence  
prédéterminée propre au point i, k est un nombre entier  
30 compris entre 0 et n, n est un nombre entier au moins égal  
à 2 et  $\delta f$  est un pas fréquentiel prédéterminé, les  
fréquences  $f_{0,i}$  respectives propres aux différents points i  
étant distinctes et comprises dans une bande de fréquences  
de largeur  $\delta f$ ,

35 **et en ce qu'**au cours de l'étape (c), on calcule chaque

10

réponse impulsionnelle  $h_{ij}(t)$  à partir d'un signal de corrélation entre le signal  $e_i(t)$  émis au point  $i$  et le signal  $r_j(t)$  capté au point  $j$ .

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel  
5 les fréquences  $f_{0,i}$  respectives propres aux différents points  $i$  sont séparées deux à deux par un écart  $\delta f/N$ .

3. Procédé selon la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel au cours de l'étape (c), ledit signal de corrélation est fenêtré au moyen d'une  
10 fonction porte  $\pi(t)$  de largeur  $1/\delta f$ .

4. Procédé selon la revendication 3, dans lequel au cours de l'étape (c), les réponses impulsionnelles  $h_{ij}(t)$  sont déterminées par la formule :

$$h_{ij}(t) = \Pi(t) \cdot \int e_i(\theta - t) \cdot r_j(\theta) d\theta .$$

15 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les ondes transmises dans le milieu entre les points d'émission et les points de réception sont des ondes acoustiques.

6. Procédé selon l'une quelconque des  
20 revendications précédentes, dans lequel au cours de l'étape (a), le milieu où sont émises les ondes est réverbérant.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le pas fréquentiel  $\delta f$  est inférieur ou égal à  $1/\tau$ , où  $\tau$  est la dispersion  
25 temporelle du milieu.

8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel le pas fréquentiel  $\delta f$  est sensiblement égal à  $1/\tau$ , où  $\tau$  est la dispersion temporelle du milieu.

9. Procédé selon l'une quelconque des  
30 revendications précédentes, dans lequel la durée  $T$  est au moins égale à  $N/\delta f$ .

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la durée  $T$  est au moins égale à  $N \cdot \tau$ , où  $\tau$  est la dispersion temporelle du

milieu.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les signaux élémentaires présentent des phases aléatoires.

5 12. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les ondes sont émises avec une certaine bande passante, les fréquences  $f_{0i}$  comprennent une fréquence minimale  $f_0$  et le nombre  $n$  est déterminé pour que la bande de fréquence comprise entre  $f_0$   
10 et  $f_0 + [(n+1) \cdot \delta f]$  recouvre sensiblement ladite bande passante.

13. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les points de réception sont confondus avec les points d'émission ( $T_1$ -  
15  $T_N$ ).

1/1

